

KARAKTERISASI FISIS DAN MEKANIS *INTERFACE ZONE* DARI LASER COATINGS Cu-Ni-Fe-Si-B DAN Ni-Cr-B-Si

Viktor Malau *)

ABSTRACT

Interface zone properties of Cu-Ni-Fe-Si-B and Ni-Cr-B-Si laser coatings have been investigated by Vickers and Hertzian microindentation method, whereby a hard pyramid or spherical indenter is pressed into the solid specimen surface. By measuring elastic and elastoplastic depth of indenter penetration, can be determined the hardness, elastic modulus and yielding stress of interface zone of the specimen.

These devices have very high sensitivity, which allow an investigation of the mechanical properties of surface layers as small as several micrometers thickness. These methods were applied to estimate the hardness, elastic modulus and yielding stress of laser coatings with 0,1 mm to 1,0 mm thickness.

PENDAHULUAN

Para perencana pada industri otomotif maupun aeronautik sering menghadapi permasalahan yang menyangkut pemilihan bahan logam yang akan digunakan menjadi komponen dasar suatu konstruksi. Bahan yang dipilih harus memiliki syarat-syarat tertentu, misalnya: cukup kuat, tahan terhadap keausan atau tahan terhadap korosi dan lain-lain. Untuk dapat memenuhi kriteria ini, bahan yang dipilih haruslah mempunyai kualitas tinggi dipandang dari sudut ilmu logam. Penggunaan logam berkualitas tinggi tentu saja akan menaikkan biaya / harga jual suatu mesin atau peralatan. Hal ini dapat berakibat bahwa perusahaan tersebut kurang mampu bersaing dengan perusahaan sejenis di pasaran. Dengan demikian penggunaan bahan berkualitas tinggi, secara ekonomis, tidak senantiasa menguntungkan.

Atas dasar pertimbangan tersebut, para perencana

Bila permukaan logam dilapisi dengan suatu zat pelapis (*coating*) tertentu, maka di antara zat pelapis dan logam yang dilapisi (logam dasar) terdapat suatu daerah yang disebut dengan *interface zone* yang memiliki sifat-sifat berbeda dari logam dasar maupun zat pelapis. Sifat-sifat *interface zone* ini dapat menggambarkan kualitas suatu *coating*. Akhir-akhir ini metode pelapisan dengan bantuan sinar laser energi tinggi sedang berkembang dalam industri otomotif dan aeronautik. Field (1993) mengutarakan bahwa sejauh ini belum ditemukan metode baku dan reproduktif yang dapat digunakan untuk menentukan sifat-sifat (khususnya kekerasan, modulus dan tegangan elastis) *interface zone* tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sifat-sifat fisis dan mekanis seperti kekerasan, modulus dan tegangan elastis *interface zone* dari *laser coatings* Cu-Ni-Fe-Si-B (dengan logam dasar dari aluminium paduan AS7G0.3) dan Ni-Cr-B-Si (dengan logam



CORE

Provided by UGM Journals, OAI Repository

perlakuan khusus pada permukaannya. Dengan perlakuan ini, permukaan logam dapat memiliki sifat-sifat fisis dan mekanis lebih baik dari logam dasarnya, bahkan dapat lebih baik dari logam berkualitas tinggi. Perlakuan khusus tersebut dapat berupa pelapisan permukaan (*coating*), perlakuan mekanis (*mechanical treatment*) atau berupa perlakuan panas (*heat treatment*). Secara umum, ada tiga tujuan utama yang ingin dicapai sehubungan dengan perlakuan khusus terhadap permukaan suatu elemen yaitu: a) meningkatkan sifat-sifat mekanis permukaan, b) meningkatkan daya tahan permukaan terhadap keausan, dan c) meningkatkan daya tahan permukaan terhadap korosi.

Untuk mendapatkan *laser coatings* ini diperlukan bahan tambah dari luar, dan pemilihan bahan tambah ini tergantung pada sifat-sifat permukaan yang dikehendaki. Lapisan permukaan berupa paduan Cu, Ni, Fe, Si, B pada logam dasar aluminium paduan dimaksudkan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis permukaan, sedangkan lapisan permukaan berupa paduan Ni, Cr, B, Si terhadap logam dasar baja lunak dimaksudkan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis, daya tahan permukaan terhadap keausan dan korosi.

Tulisan ini hanya membicarakan sifat-sifat fisis dan mekanis *interface zone* saja sedangkan proses

[Metadata, citation and similar papers at core.ac.uk](https://core.ac.uk)

* Dr. Ir. Viktor Malau, DEA., Dosen Jurusan Teknik Mesin FT. UGM

realisasi pembuatan *coatings* dengan bantuan sinar laser tidak akan dibahas pada tulisan ini.

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam banyak Pustaka dapat dijumpai sejumlah penelitian yang membahas distribusi kekerasan di sekitar *interface zone* suatu *coating* dengan metode indentasi mikro Vickers (indentor berupa piramida intan). Kekerasan permukaan (HV) spesimen dapat dicari dengan persamaan

$$HV = \frac{1,854F}{D^2} \quad (1)$$

dengan F: beban indentasi (kg), D: diagonal bekas injakan indentor (mm).

Secara teoritis, HV konstan untuk semua beban indentasi yang diberikan, tetapi penelitian Malau (1997) menunjukkan bahwa HV tergantung pada beban indentasi F terutama untuk spesimen keras. Hal ini disebabkan oleh sifat elastis yang dimiliki oleh permukaan spesimen.

Akhir-akhir ini, teknik *depth sensing indentation* dengan indentor berupa bola sedang dikembangkan untuk menentukan sifat-sifat mekanis bahan, terutama sifat-sifat lapisan permukaan. Teknik ini memungkinkan untuk merekam secara kontinu beban indentasi (F) dan kedalaman penetrasi injakan (δ) untuk satu siklus pembebanan (*loading* dan *unloading*). Berriche (1995) menyebutkan bahwa kurva *unloading* yang diperoleh dengan teknik ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk memperkirakan modulus elastis permukaan spesimen. Hasil yang diperoleh didasarkan pada sifat plastis bahan dan rumusan yang digunakan dengan teknik ini belum baku dan reproduktif.

Dalam studi ini, penulis menerapkan metode indentasi mikro Hertz untuk memperkirakan sifat-sifat mekanis *interface* antara *laser coatings* dan *laser surface alloys*. Metode ini didasarkan pada teori Hertz pada saat pembebanan masih berada dalam daerah elastis dan elastoplastis suatu bahan. Indentasi mikro Hertz ini dapat digunakan untuk memperkirakan modulus dan tegangan elastis suatu benda uji. Metode ini bersifat mikro (local) dan sangat sensitif terhadap perubahan sifat-sifat mekanis permukaan benda uji.

Teori Hertz

Bila suatu indentor sferis ditekan dengan gaya tekan relatif kecil pada permukaan datar benda uji, maka kontak yang terjadi akan bertumpu pada satu titik saja. Jika gaya yang bekerja cukup besar, kontak yang terjadi bukan lagi bertumpu pada satu titik, tetapi akan membentuk penampang sferis seperti diperlihatkan

kan pada Gambar 1. Dalam hal ini indentor harus cukup kaku (*rigid*) dibandingkan dengan benda uji. Besarnya defleksi yang timbul pada permukaan benda uji tergantung pada besar beban yang diberikan dan sifat-sifat mekanis dari kedua benda yang saling kontak. Hertz telah menjabarkan parameter indentasi sebagai fungsi beban dan sifat-sifat mekanis dari kedua benda yang saling kontak. Parameter tersebut meliputi tekanan kontak, defleksi elastis permukaan benda uji (δ) dan radius lingkaran kontak elastis (a). Rumusan matematis yang diberikan oleh Hertz cukup panjang dan sangat rumit.

Lubkin (1972) dan Johnson (1985), dengan beberapa penyederhanaan terhadap rumusan matematis dari Hertz, menuliskan hubungan antara defleksi elastis permukaan benda uji (δ) dengan radius lingkaran kontak elastis (a) seperti persamaan berikut:

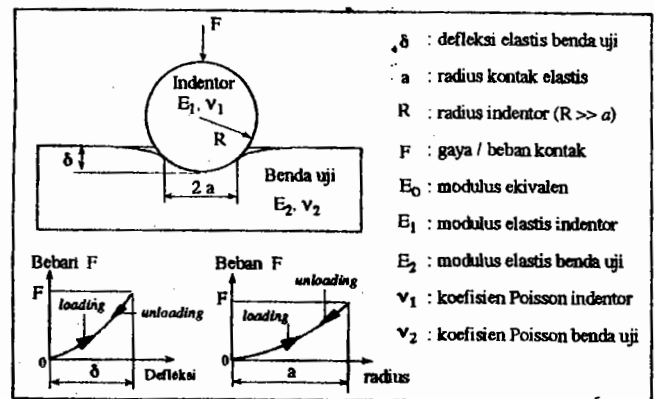
$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9}{12 R E_0^2} F^{2/3}} = \frac{a^2}{F} \quad (2)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 R}{4 E_0} F^{1/3}} = (\delta R)^{1/2} \quad (3)$$

dengan: F = beban indentasi
R = radius indentor
 E_0 = modulus ekivalen

$$\frac{1}{E_0} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

E_1 = modulus elastis indentor,
 ν_1 = angka Poisson indentor
 E_2 = modulus elastis benda uji,
 ν_2 = angka Poisson benda uji.



Gambar 1: Parameter indentasi elastis

Menurut Sharp (1993), tegangan indentasi yang timbul (σ) pada permukaan benda uji dapat diungkapkan dengan persamaan:

$$\sigma \approx F/(\pi a^2) \quad (5)$$

Malau (1996) telah menjabarkan bahwa tegangan indentasi Hertz (σ) mempunyai hubungan linier dengan radius kontak elastis (a). Hubungan tersebut dapat diungkapkan dalam bentuk:

$$\sigma = \frac{4}{3\pi} \frac{E_o}{R} a \quad (6)$$

Rumus-rumus Hertz di atas berlaku dengan mengasumsikan bahwa:

- Benda uji homogen atau dianggap homogen: berarti teori ini tidak bisa diterapkan pada benda uji yang mempunyai sub-lapisan dengan sifat mekanis berbeda dengan lapisan di atasnya.
- Ukuran benda uji tak terhingga. Dalam kenyataannya, ukuran benda uji selalu terbatas. Teori Hertz ini dapat diterapkan pada benda uji dengan ukuran terbatas bila pengujian berada pada kondisi: $H/a > 2$ dan $R \gg a$ (H : tebal lapisan homogen, a : radius lingkaran kontak elastis dan R : radius indenter).

PELAKSANAAN PENELITIAN

Alat Penelitian

Mesin atau alat penelitian terdiri dari

- Sebuah *Vickers microhardness Leitz Miniload 2* dengan indenter Vickers dan beban bervariasi dari 0,05 sampai 5 N. Indenter terdiri dari piramida intan dengan modulus elastis $E_1 = 1141$ Gpa dan koefisien Poisson $\nu_1 = 0,07$. Alat ini dilengkapi dengan mikroskop optik dan peralatan untuk mengukur panjang diagonal bekas injakan indenter.
- Sebuah *Hertz microindentation* dengan indenter berupa bola dan beban bervariasi dari 0,01 sampai 40 N. Indenter berbentuk bola dari bahan Si_3N_4 dengan modulus elastis $E_1 = 310$ Gpa, kekerasan Vickers HV = 1500 dan koefisien Poisson $\nu_1 = 0,27$. Alat ini dilengkapi dengan komponen *microdisplacement* yang berfungsi untuk menyetel lokasi indentasi yang dikehendaki pada permukaan spesimen. Alat ini dapat bekerja secara otomatis dan dilengkapi dengan dua buah motor listrik (satu untuk proses *loading* dan satu lagi untuk proses *unloading*).

Benda Uji

Benda uji terbuat dari aluminium paduan dan baja lunak yang pada permukaannya terdapat *laser coating* yang diperoleh dengan bantuan sinar laser energi tinggi dengan bahan tambah tertentu. Benda uji pertama berupa *laser coatings* Cu-Ni-Fe-Si-B (tebal lapisan $\approx 600 - 700 \mu m$) dengan logam dasar AS7G0.3. Benda uji kedua berupa *laser coatings* Ni-Cr-B-Si (tebal lapisan $\approx 300 - 525 \mu m$) dengan logam dasar baja lunak S20C. Dalam hal ini diperlukan bahan tambah berupa campuran serbuk Cu, Ni, Fe, Si, B atau campuran serbuk Ni, Cr, B, Si yang diinjeksikan ke permukaan logam dasar dengan bantuan sinar laser sehingga menempel pada permukaan logam tersebut. Ukuran serbuk yang digunakan bervariasi dari 10 sampai 30 μm dengan tebal lapisan yang dihasilkan berkisar 0,1 mm sampai 1,0 mm. Benda uji berukuran: panjang = 10 mm, lebar = 10 mm dan tinggi = 10 mm. Permukaan uji cukup rata dan terhindar dari goresan-goresan dengan kekasaran permukaan bervariasi dari 0,01 sampai 0,75 μm .

Cara Percobaan

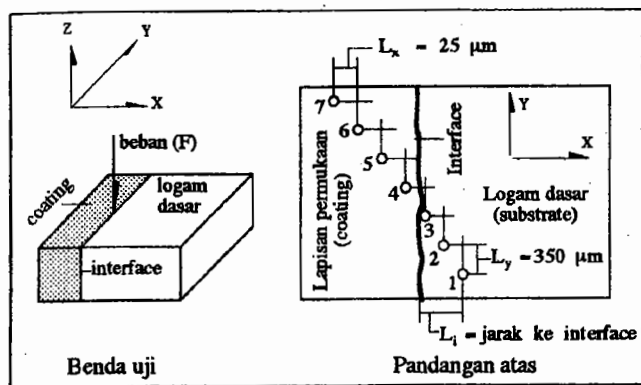
Indentasi Mikro Vickers

Percobaan dilakukan dengan memberikan beban indentasi (F) tertentu. Kemudian mesin dijalankan dan pada permukaan benda uji akan terdapat bekas injakan indenter. Indentasi dapat dipilih dengan beban bervariasi yang dimulai dari 0,05 N sampai 5 N. Penampang atas dari bekas injakan ini berbentuk bujur sangkar dengan panjang diagonal D . Lalu panjang diagonal diukur dengan bantuan mikroskop optik. Beban indentasi yang bervariasi ini akan menghasilkan diagonal bekas injakan bervariasi pula, dengan demikian akan diperoleh harga kekerasan HV sebagai fungsi beban yang diberikan.

Indentasi Mikro Hertz

Langkah pertama yang harus ditempuh pada percobaan ini adalah melakukan kontak langsung tanpa beban antara indenter dan permukaan uji untuk mendapatkan titik kontak referensi. Kemudian diberi beban bervariasi dari 0,01 sampai 40 N dan mesin dijalankan, lalu defleksi yang timbul dicatat untuk tiap beban yang diberikan. Radius kontak a dapat dihitung berdasarkan persamaan (3) dan tegangan σ dihitung dengan persamaan (5). Modulus elastis bahan dapat diketahui dengan bantuan persamaan (6), sedang tegangan elastisnya dapat dicari berdasarkan kurva σ vs a .

Titik-titik indentasi pada *interface zone* antara *coating* dan logam dasar, baik untuk indentasi Vickers maupun indentasi Hertz, diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Titik-titik indentasi pada *interface zone*

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Distribusi Kekerasan Vickers

Gambar 3 a) memperlihatkan struktur mikro lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B pada permukaan aluminium paduan AS7G0.3. Struktur lapisan (*coating*) terlihat cukup homogen. Poire (1994) telah melakukan karakterisasi fisis terhadap *interface zone* spesimen ini dan disebutkan bahwa pada zona tersebut terbentuk sejumlah paduan intermetalik seperti Ni₃Al yang membuat zona ini lebih keras dan getas.

Lapisan berupa paduan Ni-Cr-B-Si pada permukaan baja S20C, Gambar 3 b), memperlihatkan struktur sangat halus dan adanya *interface* yang sangat jelas. Pada *coating* terdapat partikel-partikel keras yang kemungkinan terdiri dari CrB₂ dalam matrik Ni-Cr. Pada spesimen ini tidak terjadi reaksi (reaksi sangat kecil) antara logam pelapis dengan baja S20C. Pada logam dasar S20C terdapat suatu zona HAZ (*Heat Affected Zone*) dengan struktur lebih halus.

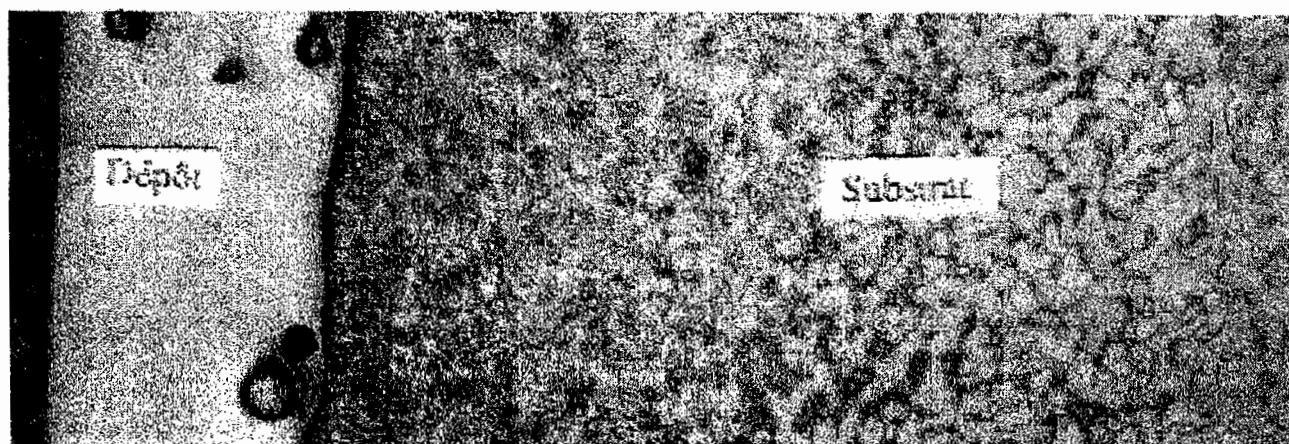


coating Cu-Ni-Fe-Si-B

— 100 μm

logam dasar AS7G0.3

(a)



coating Ni-Cr-B-Si

— 100 μm

baja lunak

(b)

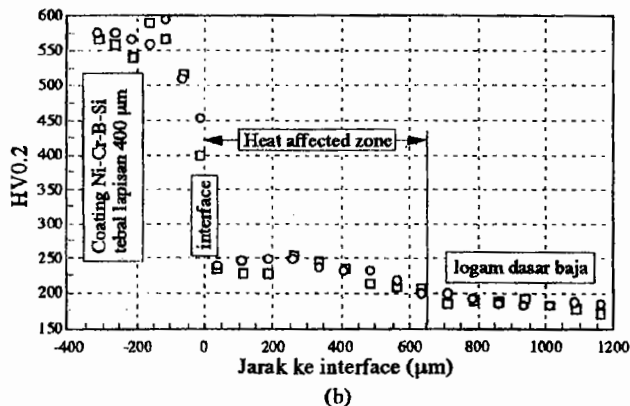
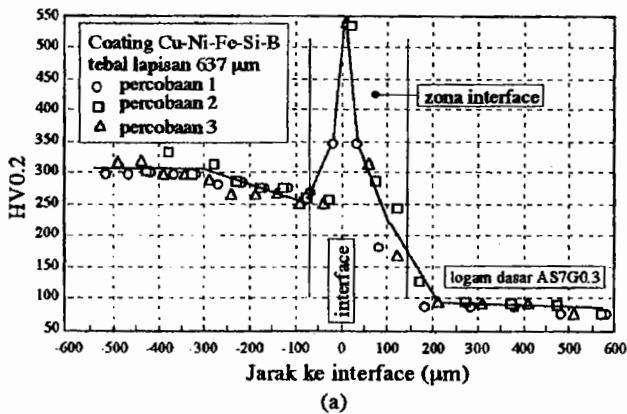
Gambar 3 : *Laser coatings*

a) Lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B terhadap aluminium AS7G0.3

b) Lapisan Ni-Cr-B-Si terhadap baja lunak S20C

Gambar 4 memperlihatkan distribusi kekerasan HV pada *interface zone* pada lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B dan lapisan Ni-Cr-B-Si. Harga kekerasan dihitung pada beban indentasi 200 g (0,2 kg) yang disingkat dengan notasi HV0.2. Khusus lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B, bila dimisalkan *interface* sebagai acuan, maka berdasarkan Gambar 4 a) dapat dikatakan bahwa:

1. pada posisi antara -100 dan - 300 μm dari *interface* terjadi peningkatan kekerasan lapisan.
2. pada posisi antara - 300 μm sampai ke permukaan lapisan terdapat kekerasan 305 ± 20 HV0.2
3. pada *interface zone* (antara - 100 dan + 200 μm) terlihat bahwa harga HV yang tidak teratur dan mencapai harga maksimum ≈ 525 HV0.2. Hal ini kemungkinan besar disebabkan adanya paduan-paduan intermetalik yang timbul pada zona ini.
4. kekerasan logam dasar AS7G0.3 sekitar 94 HV0.2 dicapai pada jarak lebih besar dari + 200 μm dari *interface*.



Gambar 4 : Distribusi kekerasan HV

- 1) Lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B terhadap aluminium AS7G0.3
- 2) Lapisan Ni-Cr-B-Si terhadap baja lunak S20C

Kurva kekerasan lapisan Ni-Cr-B-Si pada permukaan logam dasar baja S20C, Gambar 4 b), memperlihatkan bahwa kekerasan mencapai 575 HV0.2 pada bagian luar lapisan Ni-Cr-B-Si. Harga kekerasan pada *interface* ini mengalami penurunan drastis menjadi 230 HV0.2 dan harga ini bertahan sampai daerah HAZ. Penurunan drastis ini disebabkan oleh logam pelapis yang tidak bereaksi (tidak terjadi difusi) dengan logam dasar, sementara logam dasar sendiri mempunyai kekerasan 180 HV0.2. Kedua jenis spesimen yang diteliti memperlihatkan bahwa nilai kekerasan pada *interface* atau *interface zone* tidak lebih rendah dibandingkan dengan kekerasan logam dasar masing-masing spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa *interface zone* terhindar dari porositas yang dapat merugikan.

Distribusi Tegangan Elastis

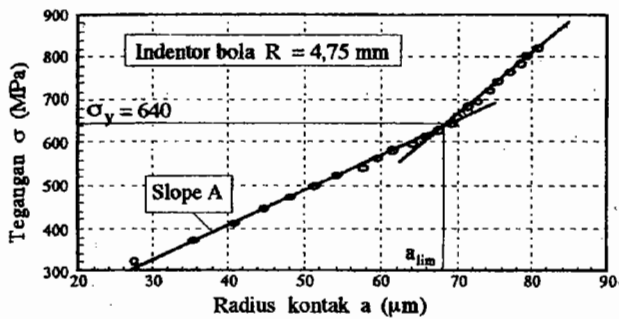
Tegangan dan modulus elastis benda uji dapat diperkirakan berdasarkan kurva yang menggambarkan hubungan antara σ dan radius kontak a yang diperoleh lewat indentasi Hertz untuk satu siklus pembebanan. Gambar 5 memperlihatkan kurva σ vs a pada daerah elastis dan elastoplastis sebuah lapisan permukaan dari paduan Cu-Ni-Fe-Si-B pada logam dasar AS7G0.3. Kurva ini menunjukkan bahwa tegangan $\sigma \leq \sigma_y$ (dengan $\sigma_y = 640$ MPa) terdapat hubungan linier antara σ dan a , yaitu pada saat pembebanan masih berada dalam daerah elastis bahan. *Slope* pada daerah elastis, berdasarkan persamaan (6), adalah

$$A = \frac{4 E_o}{3\pi R}$$

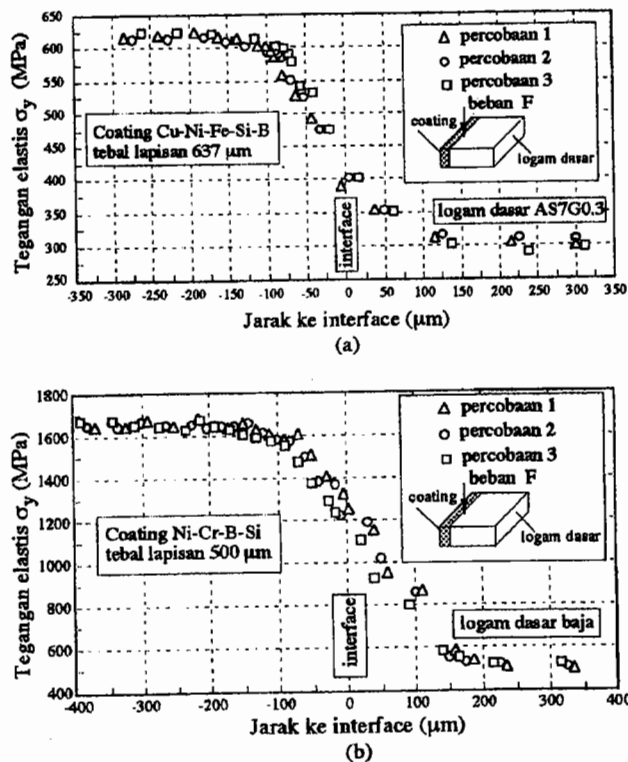
$$A = \frac{\sigma_y}{a_{lim}} = \frac{640 \text{ MPa}}{68 \mu\text{m}} = 9,4118 \text{ MPa}/\mu\text{m}$$

Radius indenter $R = 4,75$ mm, dengan demikian akan diperoleh harga $E_o = 105337 \text{ MPa} \approx 106 \text{ GPa}$. Indenter yang digunakan mempunyai modulus elastis $E_1 = 310 \text{ GPa}$ dan $\nu_1 = 0,27$. Jika diambil koefisien Poisson spesimen $\nu_2 = 0,3$ maka berdasarkan persamaan (4) modulus elastis spesimen $E_2 \approx 142 \text{ GPa}$.

Perhitungan di atas merupakan prosedur yang ditempuh untuk menentukan harga σ_y dan E_2 pada satu titik (lokasi) indentasi saja, sedang nilai σ_y dan E_2 pada titik-titik (lokasi) lainnya pada *interface zone* dapat diketahui dengan melakukan indentasi pada titik-titik tersebut. Gambar 6 dan 7 memperlihatkan distribusi σ_y dan E_2 pada *interface zone* untuk lapisan permukaan Cu-Ni-Fe-Si-B dan Ni-Cr-B-Si.



Gambar 5 : σ vs a lapisan permukaan dari paduan Cu-Ni-Fe-Si-B



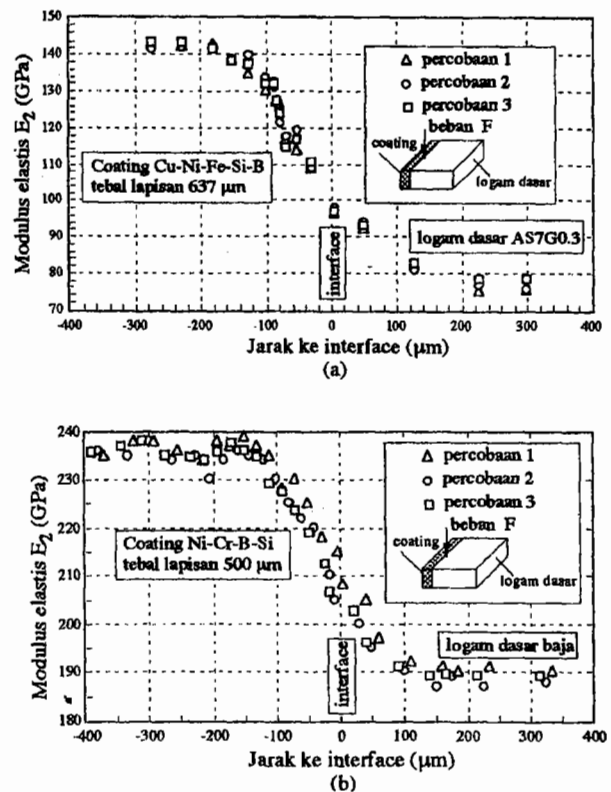
Gambar 6: Distribusi tegangan elastis σ_y pada *interface zone*
a) lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B dengan logam dasar aluminium AS7G0.3
b) lapisan Ni-Cr-B-Si dengan logam dasar baja lunak S20C

Tegangan elastis pada *interface zone* dari lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B (dengan logam dasar aluminium AS7G0.3) bervariasi dari 300 MPa sampai 625 MPa. Tegangan pada zona ini berubah secara halus dan memperlihatkan kecenderungan yang berbeda dengan distribusi kekerasan pada zona tersebut.

Tegangan elastis pada *interface zone* dari lapisan Ni-Cr-B-Si dengan logam dasar baja lunak S20C bervariasi secara halus dari 500 MPa sampai 1650 MPa. Hal ini memberi kondisi berbeda dengan distribusi kekerasan yang berubah drastis di sekitar *interface zone*.

Distribusi Modulus Elastis

Distribusi modulus elastis E_2 pada *interface zone* untuk lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B dan Ni-Cr-B-Si yang diperlihatkan Gambar 7 mempunyai kecenderungan yang hampir sama dengan distribusi tegangan. Modulus elastis lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B bervariasi dari 75 GPa (pada logam dasar) sampai 142 GPa pada permukaan lapisan. Lapisan Ni-Cr-B-Si mempunyai modulus bervariasi dari 190 GPa (pada logam dasar S20C) sampai 237 GPa pada permukaan lapisan.



Gambar 7: Distribusi modulus elastis E_2 pada *interface zone*
a) lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B dengan logam dasar aluminium AS7G0.3
b) lapisan Ni-Cr-B-Si dengan logam dasar baja lunak S20C

Sifat-sifat lapisan Cu-Ni-Fe-Si-B dan Ni-Cr-B-Si dapat diringkas dalam bentuk tabel berikut ini:

Tabel 1: Sifat-sifat mekanis lapisan

Lapisan	Kekerasan HV0,2	Modulus E (GPa)	Tegangan σ_y (MPa)
Logam dasar			
Cu-Ni-Fe-Si-B AS7G0.3	305 94	142 75	625 300
Ni-Cr-B-Si S20C	575 180	237 190	1625 500

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Modulus dan tegangan elastis dari *laser coatings* Cu-Ni-Fe-Si-B dan Ni-Cr-B-Si pada *interface zone* berubah secara perlahan. Hal ini berbeda dengan kekerasan, dimana *interface zone* memberi perubahan kekerasan secara drastis terutama untuk lapisan Ni-Cr-B-Si.
2. Harga kekerasan yang diperoleh membuktikan bahwa *interface zone* terhindar dari porositas, dan hal ini juga menunjukkan bahwa terjadi ikatan yang sangat kuat antara masing-masing lapisan dengan logam dasarnya.
3. Secara umum *laser coatings* meningkatkan sifat-sifat mekanis permukaan (lebih baik dari sifat-sifat logam dasar)
4. Metode ini dapat diterapkan langsung pada lapisan tipis permukaan dengan hasil cukup reproduktif.

Untuk dapat menganalisis sifat-sifat permukaan dari benda-benda uji dengan lapisan permukaan yang lebih tipis lagi, sebaiknya dipilih indenter bola berdiameter lebih kecil agar diperoleh hasil yang lebih presisi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Prof. Dr. A.B. VANNES dari Laboratorium Ingénierie et Fonctionnalisation des Surfaces (IFOS) pada Département Matériaux – Mécanique – Physique, Ecole Centrale de Lyon, France atas saran dan komentarnya saat penulis melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Berriche, R. (1995): "Vickers Hardness from Plastic Energy", *Jur. Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 32, No. 4, pp. 617-620.
- Field, J.S. and Swain, M.V., (1993): "A Simple Predictive Model for Spherical Indentation", *Jur. Materials Research Society*, Vol. 8, No. 2, pp. 297-306.
- Johnson, K.L., (1985): *Contact Mechanics*, First Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lubkin, J. L., (1972): *Contact Problems*, First Edition, Elsevier, New York.
- Malau, V., (1997): "Elastic Recovery Effect on Vickers Microhardness of Hard Coatings", *Forum Teknik*, Jilid 21, No. 2, pp.315-324.
- Malau, V., (1996): "Determination a l'aide de Microindentations Hertzienne et Vickers des Propriétés Micromécaniques de Couches Superficielle Elaborées notamment par Faisceaux Lasers", *Disertasi Doktor*, No. 96-36, Ecole Centrale de Lyon, France.
- Poire, L. (1994): "Revetement de Surface par Laser, Protection Thermomécanique de l'Alliage AS7G0.3 par des Couches en Alliages de Cuivre", *Disertasi Doktor*, Ecole Centrale de Lyon, France.
- Sharp, S.J.; Asbhy, M.F. and Fleck, N.A (1993); "Materials Response Under Static and Sliding Indentation Loads", *Jur. Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 41, No. 3, pp. 685-692